



# INTRO UNE INTRODUCTION À TION DU C TION

## UN SIÈCLE DE GRAVITATION

De l'éclipse de 1919  
à l'image d'un trou noir

Ron Cowen

*Traduction de Michel Le Bellac*

edp sciences



## UN SIÈCLE DE GRAVITATION De l'éclipse de 1919 à l'image d'un trou noir

Ce livre est le récit d'une aventure, celle de la théorie moderne de la gravitation, depuis ses premiers balbutiements de 1907, lorsqu'Einstein énonce sa version du principe d'équivalence, jusqu'aux premières images d'un trou noir en 2019. L'auteur évoque aussi bien les doutes, les impasses et même les erreurs des scientifiques que leurs exploits et leurs succès intellectuels et technologiques. Ces exploits ont permis, entre autres, de lever le voile sur les objets les plus monstrueux du cosmos, les trous noirs.

Les scientifiques furent des aventuriers, qui n'ont pas hésité à emprunter des chemins extraordinairement périlleux afin de tester toutes les facettes de la théorie d'Einstein de la gravitation : depuis les voyages sous les Tropiques d'Eddington et ses collaborateurs pour observer l'éclipse de Soleil de 1919 à la construction de détecteurs d'ondes gravitationnelles, en passant par le réseau mondial de télescopes capable de faire l'image d'un trou noir.

Dans un style concis et alerte, Ron Cowen nous fait vivre l'histoire de la relativité générale et de ses protagonistes, sans oublier les applications à la théorie du Big Bang et les pistes de recherches actuelles sur la gravitation quantique.

*Ron Cowen est journaliste scientifique ; il a écrit entre autres pour le New York Times, Nature, Science, ou Scientific American.*

*Michel Le Bellac est professeur émérite de physique à l'Université de la Côte d'Azur.*

Isbn : 978-2-7598-2465-6



9 782759 824656

Création graphique : Béatrice Couëdel

edp sciences  
www.edpsciences.org

La collection « **UNE INTRODUCTION À...** » se propose de faire connaître à un large public les avancées les plus récentes de la science. Les ouvrages sont rédigés sous une forme simple et pédagogique par les meilleurs experts français.

**Collection « Une Introduction à »**  
dirigée par Michèle Leduc et Michel Le Bellac

# **Un siècle de gravitation**

**De l'éclipse de 1919 à l'image d'un trou noir**

**Ron Cowen**  
**Traduction de Michel Le Bellac**



EDP Sciences  
17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

### **Dans la même collection**

*Le temps : mesurable, réversible, insaisissable ?*

Mathias Fink, Michel Le Bellac et Michèle Leduc

*La révolution des exoplanètes*

James Lequeux, Thérèse Encrenaz et Fabienne Casoli

*À l'orée du cosmos*

Alain Omont

*Vertigineuses symétries*

Antony Zee, traduit par Michel Le Bellac

*Le temps des neurones – Les horloges du cerveau*

Dean Buonomano, traduit par Michel Le Bellac

*Voyage dans les mathématiques de l'espace-temps*

Stéphane Collion

*Les planètes et la vie*

Thérèse Encrenaz, James Lequeux et Fabienne Casoli

*Quantique : au-delà de l'étrange*

Philip Ball, traduit par Michel Le Bellac

Retrouvez tous nos ouvrages et nos collections sur <http://laboutique.edpsciences.fr>

Authorized French translation from the English language edition entitled "Gravity's Century : From Einstein's Eclipse to Images of Black Holes" by Ron Cowen, Published by arrangement with Harvard University Press, ©Ron Cowen 2019.

**Illustration de couverture :** Silhouette du trou noir central de la galaxie M87 vue par le Télescope de l'Horizon des Événements.

*Imprimé en France*

**ISBN (papier) :** 978-2-7598-2465-6 – **ISBN (ebook) :** 978-2-7598-2511-0

© 2020, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

# Remerciements

Il n'aurait pas été possible d'écrire ce livre sans l'expertise inestimable, le soutien et la patience de Richard Panek et de Pamela Pagliochini. L'auteur exprime également sa profonde reconnaissance à l'astronome et écrivain Steve Maran, à Jeff Dean de *Harvard University Press* pour ses conseils et sa relecture, à Louise Robbins, Emerald Jensen-Roberts et Stephanie Vyce de *Harvard University Press*, ainsi qu'à Sherry Gerstein de *Westchester Publishing Services*. L'auteur remercie les nombreux chercheurs et historiens des sciences qui lui ont fourni de l'aide, de l'intuition et des conseils, parmi eux Dieter Brill, Shep Doeleman, Heino Falcke, Vincent Fish, Daniel Harlow, Daniel Holz, Scott Hughes, Ted Jacobson, Daniel Kennefick, Jean-Pierre Luminet, John Mather, Charles Misner, John Norton, Don Page, Lenny Susskind, Brian Swingle, Virginia Trimble, Mark Van Raamsdonk, Galina Weinstein et Clifford Will. Je remercie également Barbara Wood, Lorraine Wodiska, la *Wednesday night league*, Phil McQueen et l'éminent écrivain des sciences et humoriste Davide Castelvecchi. Et un salut particulier à Cathy Winter et Julie Cowen pour leur patience et leur soutien.

## Remerciements du traducteur

Je suis très reconnaissant à Alain Omont pour sa relecture soignée du manuscrit.



# Table des matières

Remerciements	iii
Introduction	1
1 La genèse	5
1.1 Plongée en eaux profondes : l'espace et le temps, un mariage parfait .....	16
1.2 Plongée en eaux profondes : tests du principe d'équivalence avant Einstein .....	19
2 Du grand chambardement au triomphe	23
2.1 Plongée en eaux profondes : le tenseur de Riemann et le tenseur métrique .....	39
2.2 Plongée en eaux profondes : la signification des équations d'Einstein .....	41
3 Eddington en mission	43
3.1 Plongée en eaux profondes : une histoire de la déviation de la lumière .....	58
3.2 Plongée en eaux profondes : une éclipse de Soleil récente ...	60
4 L'Univers se dilate	63
5 Trous noirs et tests de la relativité générale	77
5.1 Plongée en eaux profondes : les nouveaux tests du principe d'équivalence .....	86
5.2 Plongée en eaux profondes : tests de la relativité générale ...	89
6 Gravitation quantique	93
6.1 Plongée en eaux profondes : les trous noirs et le paradoxe de l'information .....	108
7 À l'écoute des trous noirs	115
7.1 Plongée en eaux profondes : LIGO et au-delà.....	128
7.2 Plongée en eaux profondes : les ondes gravitationnelles, perdues et retrouvées .....	134
8 Images de trous noirs	139
8.1 Plongée en eaux profondes : une illustration des trous noirs ...	150
Bibliographie	153
Index	159



# Introduction

Pour le monstre au cœur de la Voie lactée, il s'agissait de son enveloppe.

Le 11 avril 2017, une équipe d'astronomes mit fin à cinq nuits d'observations qui utilisaient un réseau de télescopes agissant de concert et formant une antenne virtuelle géante dont la taille était le diamètre de la Terre. Répartis sur tous les continents, y compris l'Antarctique, huit groupes de télescopes avaient passé ces cinq nuits à observer un objet que personne n'avait jamais pu voir auparavant, bien que des scientifiques visionnaires ou des aficionados de la science-fiction eussent tenté de l'imaginer depuis des décennies : un trou noir.

Plus précisément, ce que les astronomes ont observé est la frontière du trou noir, une surface immatérielle enveloppant une gravitation si intense que rien ne peut échapper à son emprise, même pas la lumière. Une fois qu'un objet quel qu'il soit traverse cette frontière – que les scientifiques appellent *l'horizon des événements* – cet objet disparaît à jamais de notre Univers. Mais même après cette disparition, le contenu du trou noir continue à participer à une distorsion de l'espace-temps qui défie l'intuition et qui, pour quiconque est curieux de ce qui se passe dans la Nature, doit être vu pour être cru.

Ce n'est pas cependant la foi qui a motivé les créateurs de l'EHT (*Event Horizon Telescope* : Télescope de l'horizon des événements). L'idée était avant tout de comprendre, parce que commencer à comprendre ce qu'est véritablement un trou noir renouvelle notre compréhension de l'Univers : c'est entrer dans une ère d'exploration dont Albert Einstein lui-même ne croyait pas qu'elle pût se produire un jour, bien que plus que quiconque il l'ait rendue possible.

Un siècle auparavant, en 1915, Albert Einstein avait mis la touche finale à sa théorie de la relativité générale. Il avait compris l'impact essentiel d'une loi de la physique que Galilée avait énoncée presque trois cents ans plus tôt : tous

les objets, quelle que soit leur masse ou leur composition, tombent de la même façon dans un champ de gravitation. Faisant de cette loi la pierre angulaire d'une théorie révolutionnaire traitant de l'accélération des objets, Einstein avait forgé une nouvelle façon de penser non seulement la gravitation mais l'Univers dans son intégralité.

Einstein avait abandonné l'idée que la gravitation était une force et avait réfuté la notion qui prévalait depuis Newton d'un espace-temps sans structure, spectateur silencieux des allers et retours dans l'Univers, arène immuable où se déroulent les événements. En fait, selon Einstein, l'espace-temps était malléable comme du mastic, et sa forme était régie par la présence de masse et d'énergie. Un objet ne tombait pas parce que la Terre exerçait une force sur celui-ci : au contraire, la masse et l'énergie de la Terre courbaient l'espace-temps dans son voisinage de telle sorte qu'un objet passant à proximité voyait sa trajectoire courbée vers son centre. La même conception s'appliquait à l'ensemble de l'Univers. Même la lumière devait se plier à cette loi de la Nature : si elle passait au voisinage d'un corps massif, par exemple le Soleil, sa trajectoire devait aussi être courbée.

Pendant l'éclipse solaire du 29 mai 1919, alors que les ravages de la première guerre mondiale étaient encore dans toutes les têtes, deux équipes d'astronomes britanniques s'embarquèrent dans deux expéditions, l'une au Brésil et l'autre sur la côte ouest de l'Afrique, afin de tester la nouvelle et étrange théorie de la gravitation issue du cerveau d'un physicien né en Allemagne. Alors que la Lune s'insérait entre la Terre et le Soleil pendant six minutes et cinquante et une secondes – l'éclipse du 29 mai 1919 fut l'une des éclipses les plus longues du *XX<sup>e</sup>* siècle – les deux équipes prirent des clichés d'étoiles qui devenaient visibles alors qu'un jour brillant se transformait en une nuit soudaine. Lorsque les astronomes une fois rentrés chez eux comparèrent ces images avec celles de ces mêmes étoiles et de leur position lorsque leur lumière ne passait pas au voisinage du Soleil, ils furent capables de confirmer ce qu'Einstein avait prédit : la masse du Soleil courbait la trajectoire de la lumière. En raison de cette seule prédiction, Einstein devint une célébrité du jour au lendemain et sa théorie fit la une des journaux dans le monde entier.

C'était le début du siècle de la gravitation.

Ces deux expériences à un siècle d'intervalle – les expéditions de l'éclipse de 1919 et le Télescope de l'horizon des événements – bouclent une période qui ne ressemble à aucune autre dans l'histoire de la science.

Il y a cent ans, lorsqu'Einstein mettait au point sa théorie de la relativité générale, il était admis que l'Univers ne comprenait qu'une seule galaxie, notre Voie lactée ; aujourd'hui nous savons non seulement qu'il comprend au moins cent milliards de galaxies, mais qu'en plus il est en expansion et que cette expansion

s'accélère. De plus, au cours de ces cent dernières années, l'astronomie est passée de l'étude d'une bande électromagnétique étroite, celle du rayonnement optique, visible dans des télescopes commerciaux, à l'étude de l'ensemble du spectre électromagnétique, depuis les ondes radio jusqu'aux rayons gamma. Au début du XXI<sup>e</sup> siècle, l'astronomie s'est projetée au-delà du spectre électromagnétique : on a commencé à utiliser les ondes gravitationnelles, dont nous parlerons longuement par la suite, et aussi les neutrinos. Enfin on s'est rendu compte que des entités encore mystérieuses, la matière sombre et l'énergie sombre, forment environ 95 % de l'Univers.

Quiconque essaie de donner un sens à ces découvertes doit payer son tribut à la relativité générale. Mais aucun phénomène n'est plus contre-intuitif qu'un trou noir. L'idée du trou noir était cependant une conséquence naturelle de la relativité générale, ce dont certains théoriciens se rendirent compte dès qu'Einstein l'eut formulée.

Si un objet était suffisamment dense et massif, est-ce que l'espace-temps ne serait pas tellement tordu qu'il se replierait sur lui-même ? Non seulement la lumière passant à proximité verrait sa trajectoire courbée, mais si elle passait trop près, elle tomberait dans un piège gravitationnel pour ne jamais en sortir.

Einstein n'a jamais vraiment accepté le concept de trou noir : il lui semblait que ses équations élégantes explosaient et perdaient leur signification. Pendant des décennies, lui-même et bien d'autres physiciens se sont permis d'ignorer ce concept.

En parallèle, une autre révolution se produisait, cette fois dans la technologie des télescopes. Des observations au début des années 1960 ont révélé que des sources de rayonnement, situées dans les confins les plus extrêmes de l'Univers, surpassaient en luminosité des galaxies entières, et que des étoiles tournoyaient autour de centres galactiques avec des vitesses vertigineuses. Ces énergies énormes et ces vitesses incroyables trahissaient la présence de mastodontes gravitationnels invisibles au cœur de certaines galaxies. Les trous noirs, telles des mâchoires avalant l'espace-temps, étaient devenus réalité.

Les théoriciens commencèrent à s'y intéresser. Ils comprirent que les trous noirs étaient un creuset pour le mariage de la physique de l'infiniment petit – le domaine de la physique quantique – et de la gravitation extrême, domaine où la relativité générale règne en maître. C'est un mariage qu'Einstein avait envisagé pendant des décennies, sans jamais s'en approcher.

Et lorsque les astronomes se rendirent compte que les nouvelles technologies des radiotélescopes permettaient de construire réellement l'image de l'horizon des événements d'un trou noir, qui aurait pu résister au défi ?

La collaboration du Télescope de l'horizon des événements décida de prendre pour cible deux trous noirs en particulier. Un de ces monstres

gravitationnels est Sagittarius A\*, situé à 26 000 années-lumière au centre de notre Voie lactée et dont la masse vaut environ 4 millions de fois celle du Soleil. Le second, dont la masse est encore mille fois plus grande, occupe le centre de la galaxie géante M87, située à une distance de 54 millions d'années-lumière : une année-lumière vaut  $9,46 \times 10^{12}$  km. Ces deux trous noirs offrent à la science un test crucial de la théorie d'Einstein de la relativité générale, en déterminant jusqu'à quel point ses prédictions sont en accord avec l'observation, dans un environnement gravitationnel le plus extrême connu dans l'Univers.

À 11 h 22, heure de New York, un jour de printemps 2017 par ailleurs tout à fait banal, le Télescope de l'horizon des événements enregistra son dernier photon de la saison d'observation. Les chercheurs savaient qu'ils avaient encore plusieurs mois de travail devant eux. Ils devaient analyser une masse de données équivalente à la capacité de stockage de 10 000 ordinateurs personnels. Simultanément, ils allaient se préparer à une nouvelle phase de prise de données l'année suivante. Mais à cet instant, plutôt que de se concentrer sur ce qu'ils avaient encore à accomplir, ils pouvaient faire une pause pour apprécier où ils étaient arrivés.

Un des astronomes fit retentir les chœurs triomphants de la « Rhapsodie bohémienne ». Un autre déboucha une bouteille de whisky vieille de cinquante ans. Mais, alors que la cause immédiate des festivités était la finalisation d'une expérience qui avait couvert la dimension et le souffle de la Terre, le contexte historique était encore plus vaste. Ainsi que les fêtards le savaient fort bien, il s'agissait de célébrer un siècle toujours en construction.

# 1

## La genèse

Deux mois. C'était tout le temps dont disposait Einstein en septembre 1907 pour écrire le premier article de revue sur sa théorie de la relativité restreinte, qu'il avait dévoilée deux années plus tôt. Einstein, qui à vingt-huit ans était encore à la recherche d'un poste universitaire tout en travaillant comme employé au Bureau des brevets à Berne, trouvait là l'occasion de résumer son travail encore controversé dans la revue prestigieuse *Yearbook on Electronics and Radioactivity*. Par deux fois il demanda à l'éditeur de la revue la date de remise du manuscrit.

La préoccupation d'Einstein était compréhensible. Pour subvenir aux besoins de sa femme et de son fils de trois ans, il travaillait huit heures par jour du lundi au samedi à son bureau dans le nouveau bâtiment des Postes et Télégraphes, où il évaluait les mérites des inventions électriques et autres gadgets. Il travaillait de manière si efficace – le directeur du Bureau des brevets, Friedrich Haller, l'avait en grande estime – qu'il pouvait prendre quelques heures sur son temps de travail et les consacrer à la poursuite de ses travaux de recherche.

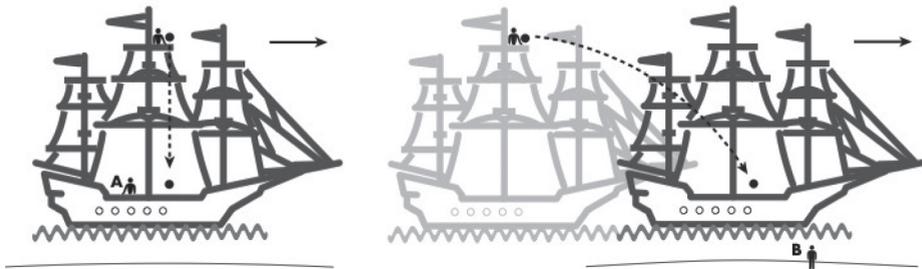
Lorsqu'Einstein eut mis un point final à son manuscrit en novembre 1907, il avait fait bien plus qu'illustrer son travail original. Sa revue contenait les prémisses d'une théorie de la relativité brillante, plus vaste et plus étrange, et qui changerait à jamais notre perception du cosmos.

Einstein commença son article par un résumé de son papier de 1905, où il révisait radicalement les notions de relativité classique telle que décrite par Galilée. Dans son livre de 1632, *Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*, le savant et inventeur italien affirmait que le comportement des objets était identique, que ces objets fussent immobiles ou en mouvement à vitesse constante.

Dans ce livre, Galilée met en scène trois personnages : Salviatus, l'alter ego de Galilée, Sagredus, un amateur intelligent, et Simplicius, qui est tout sauf brillant. Ensemble, ils cherchent à savoir si les lois qui régissent le mouvement des objets apparaîtront différentes à un observateur immobile et à un observateur en mouvement à vitesse constante.

Galilée nous demande d'abord de prendre comme exemple un navire amarré à quai dans un port. Si un marin laisse tomber une pierre depuis la tête du mât sans vitesse initiale, simplement en la lâchant, cette pierre va atterrir sur le pont au pied de ce mât. Cela est parfaitement évident aussi bien pour un observateur sur le bateau que pour un observateur sur le quai.

Considérons maintenant le même navire, dit Galilée, mais cette fois en mouvement à vitesse constante sur l'eau, disons à une vitesse de dix mètres par seconde. Répétons l'expérience : un marin en tête de mât laisse tomber une pierre en la lâchant, comme précédemment. Où la pierre va-t-elle atterrir ? Si la chute de la pierre prend une seconde, est-ce que la pierre ne va pas tomber dix mètres en arrière du pied du mât, puisque pendant la chute le navire a avancé de dix mètres ? C'est la réponse que donne Simplicius, et elle peut sembler correcte. Mais elle est fausse.



**FIGURE 1.1.** Le navire de Galilée illustre deux points de vue de sa description de la chute d'un boulet de canon lâché par un marin depuis la tête de mât d'un navire se déplaçant à vitesse constante. Pour le marin perché en tête de mât, qui se déplace avec le navire, le boulet de canon semble tomber verticalement (figure de gauche). Pour un observateur immobile sur le quai, le boulet de canon semble tomber de biais – en fait il suit une trajectoire parabolique – (figure de droite), étant donné que le navire s'est déplacé à vitesse constante pendant la durée de la chute. Mais les deux observateurs sont d'accord sur la conclusion : le boulet de canon a atterri au pied du mât.

La pierre atterrirait encore au pied du mât, juste comme dans le cas du navire immobile. Les lois du mouvement sont les mêmes, que le navire soit immobile ou en mouvement à vitesse constante : c'est le principe de relativité.

Pour le marin qui a laissé tomber la pierre depuis le sommet du mât, celle-ci tombe suivant une droite verticale et atterrit donc au pied du mât. Si vous vous

trouviez immobile sur le quai, vous seriez d'accord avec le marin sur le fait que la pierre atterrit au pied du mât, mais vous verriez la pierre tomber de biais – en fait sa trajectoire est un arc de parabole –, parce que de votre point de vue la pierre possède aussi un mouvement horizontal, le même que celui du navire.

Indépendamment de la trajectoire que chaque observateur attribue à la pierre, les lois physiques du mouvement sont les mêmes pour ces deux observateurs. De fait, disait Galilée, si vous vous trouviez dans une cabine sans fenêtre à l'intérieur du navire et que celui-ci se déplace à vitesse constante, aucune expérience ne vous permettrait de savoir si le navire est ou non en mouvement. Des poissons nageant dans un bocal ou des papillons voletant dans la cabine ne vous apparaîtraient pas différents de ceux que vous observeriez dans un navire immobile.

Ce fut l'idée de génie d'Einstein de réinterpréter et de développer le principe de relativité classique tel qu'énoncé par Galilée, en remplaçant la chute de la pierre par un rayon lumineux.

Einstein avait réfléchi à la lumière alors qu'il était encore enfant. Il avait douze ou treize ans quand un ami lui donna un livre de science-fiction écrit par Aaron Bernstein, qui emmenait ses lecteurs dans un voyage aux confins de l'Univers. Vous n'y arrivez pas en bateau ou par le train : Bernstein demande au lecteur d'imaginer qu'il chevauche un courant électrique qui court le long d'un câble télégraphique.

Einstein fut fasciné par cette image. Alors qu'il avait seize ans, inscrit dans une école d'avant-garde à Aarau en Suisse qui encourageait les représentations visuelles, il imagina un voyage encore plus fantastique où il filait à toute allure le long d'un rayon lumineux. À quoi pourrait bien ressembler un rayon lumineux s'il pouvait courir assez vite pour le rattraper ?

Le rayon lumineux, imagina-t-il initialement, devrait lui apparaître comme stationnaire, immobile, juste comme vous apparaîtrait un coureur très rapide si vous pouviez suivre sa course. Mais l'idée d'une lumière stationnaire non seulement violait l'expérience quotidienne, mais en plus contredisait ce que le physicien écossais James Clerk Maxwell avait révélé de la nature de la lumière et de sa relation avec l'électricité et le magnétisme. Les équations de Maxwell démontraient que l'électricité (par exemple la force entre des particules chargées) et le magnétisme (par exemple la force entre deux aimants) n'étaient pas des phénomènes indépendants mais deux faces d'une seule entité appelée électromagnétisme. À partir de ses équations, Maxwell découvrit également que des champs électriques et magnétiques formant un angle droit généraient une onde se propageant dans une direction perpendiculaire au plan formé par les champs, exactement à la vitesse de 299 792 km/s. C'est la vitesse de la lumière. Un rayon lumineux est une onde électromagnétique.

Il y a cependant un problème : par rapport à quoi la vitesse est-elle mesurée ? Avant Einstein, les physiciens avaient décidé que la vitesse devait être mesurée par rapport à un milieu hypothétique, de la même façon qu'il faut un milieu, par exemple l'eau ou l'air, pour qu'une onde sonore puisse se propager. Les scientifiques appelèrent éther le milieu de propagation de la lumière, mais ne purent trouver aucune preuve de son existence. Einstein voyait plus loin : il n'y avait aucun besoin d'invoquer l'éther, parce que la vitesse de la lumière ne se référait à aucun milieu de propagation. Il proposa d'exiger que les lois de la physique, y compris les équations de Maxwell, devaient être identiques et donner la même réponse pour tous les observateurs se déplaçant les uns par rapport aux autres à une *vitesse uniforme*, c'est-à-dire une vitesse constante en valeur absolue et toujours orientée dans la même direction. En effet, les équations de Maxwell prédisaient une valeur spécifique pour la vitesse de la lumière, et cette vitesse devait être identique pour tous les observateurs en mouvement à vitesse uniforme. C'était *toujours* 299 792 kilomètres par seconde. Ce qui impliquait qu'il était impossible de rattraper un rayon lumineux. Au lieu d'un rayon lumineux, on peut prendre aujourd'hui l'exemple d'une brève impulsion d'un laser femtoseconde, qui dure environ  $10^{-15}$  seconde, soit un paquet de photons d'une longueur de 3 micromètres. La vitesse que vous mesurez pour ce paquet de photons est inchangée, même si vous courez derrière lui à toute vitesse pour essayer de le rattraper.

À première vue, c'est une idée folle. Les faibles vitesses de notre expérience quotidienne sont additives : si je suis assis dans un train se déplaçant à 80 km/h et que mon train est dépassé par un autre circulant sur une voie parallèle à 100 km/h, je vois cet autre train circuler à une vitesse de  $100 - 80 = 20$  km/h. Par conséquent, si vous pouviez suivre un rayon lumineux à une vitesse vraiment très grande, vous devriez le voir voyager plus lentement que quelqu'un d'immobile, n'est-ce pas ? Einstein affirmait que non, vous alliez voir le rayon lumineux vous passer sous le nez juste aussi vite que si vous étiez immobile, ce qui était confirmé par l'expérience de Michelson et Morley<sup>1</sup>. La vitesse de la lumière est une constante. Elle ne dépend ni du mouvement de l'observateur qui la mesure, ni de la vitesse de la source de lumière qui la produit. Et, pour couronner le tout, rien ne peut voyager à une vitesse plus grande que celle de la lumière.

La vitesse se mesure comme une distance divisée par un temps ; on utilise par exemple le mètre par seconde ou le kilomètre par seconde. Si la vitesse de

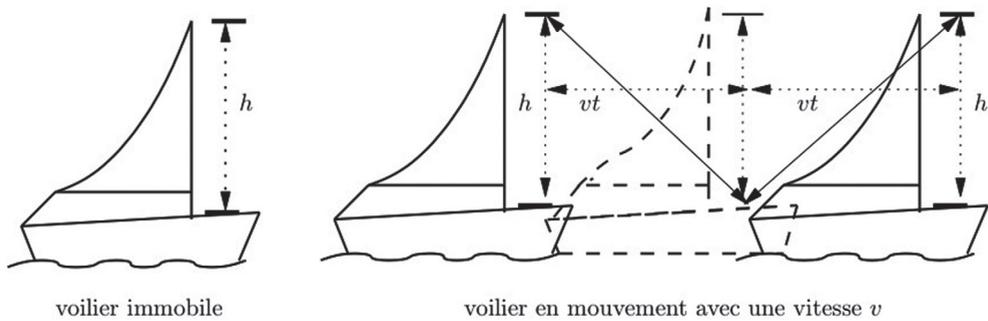
---

<sup>1</sup> Toutes les notes sont du traducteur.

Toutefois il ne semble pas qu'Einstein ait été influencé par cette expérience, et il n'est même pas certain qu'il en ait eu connaissance.

la lumière doit rester constante, soit la distance doit varier, soit le temps, soit les deux.

Revenons à l'expérience du navire de Galilée, en utilisant un rayon lumineux plutôt qu'une pierre : nous allons appeler cette expérience le voilier d'Einstein (Einstein était un marin émérite). Sur un voilier qui se déplace à une vitesse uniforme dans un port, un marin envoie depuis la tête du mât un rayon lumineux qui se réfléchit sur un miroir posé sur le pont et lui revient en tête de mât. L'observateur sur le quai est d'accord avec cette description. Mais de son point de vue, et s'il dispose d'un appareillage de mesure suffisamment sophistiqué, il verra la lumière voyager sur une distance légèrement plus grande puisque, sur son trajet aller-retour effectué suivant une ligne brisée, la lumière a parcouru les côtés d'un triangle isocèle (figure 1.2). Comme la longueur des côtés du triangle est plus grande que sa hauteur, le trajet suivi par la lumière sera plus long pour l'observateur du quai que pour le marin.



**FIGURE 1.2.** Trajectoire d'un rayon lumineux dans le voilier d'Einstein. Dans le premier cas, à gauche, le temps mesuré pour l'aller-retour de l'impulsion lumineuse est  $\tau = 2h/c$ , où  $h$  est la hauteur du mât. C'est le temps mesuré par le marin attaché au bateau. Si le bateau avance de  $vt$ , on déduit du théorème de Pythagore que  $c^2t^2 = v^2t^2 + h^2$ . Le temps mesuré par l'observateur du quai pour l'aller-retour est donc  $\tau/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ , et c'est un temps *différent* de celui mesuré par le marin.

Cependant, nous avons vu que la lumière se propage toujours à la même vitesse, mesurée en mètres par seconde, la distance divisée par le temps. Ainsi, si l'observateur du quai trouve que la lumière a parcouru une distance plus grande que celle mesurée par le marin, il en conclut nécessairement que son temps de parcours tel qu'il le mesure est plus long que celui mesuré par le marin. *Le temps mis par la lumière pour son aller-retour est plus grand pour l'observateur du quai que pour le marin.*

Le temps, par conséquent, n'est pas immuable. Un intervalle de temps, tel qu'il est mesuré par le tic-tac d'une horloge, est différent pour des observateurs qui se déplacent les uns par rapport aux autres à des vitesses différentes. Si les

observateurs sont tous en mouvement rectiligne uniforme, chacun d'entre eux voit l'horloge des autres observateurs retarder. Plus généralement, tout observateur, en mouvement uniforme ou non, dispose d'un temps qui lui est spécifique, appelé son temps propre, mesuré par une horloge qui se déplace avec lui. Si deux observateurs règlent leur montre lors d'un premier croisement, ils constateront que leurs montres ne coïncident plus lors d'un second croisement : c'est le célèbre « paradoxe » des jumeaux de Langevin. La distance est aussi affectée : les objets semblent se contracter dans la direction du mouvement.

Comment se fait-il que cela n'ait pas été remarqué plus tôt ? C'est parce que ces transformations dans l'espace et le temps ont des effets minuscules, à moins de se déplacer à des vitesses proches de celle de la lumière. Ou, ainsi que Larry Spruch, mon professeur de physique à l'université de New York, avait coutume de dire, si nous avions grandi avec des jouets relativistes se déplaçant à très grande vitesse, nous comprendrions intuitivement que l'espace et le temps ne sont pas absolus.

Mais il s'est avéré qu'une entité, l'espace-temps, restait égale à elle-même. Le mathématicien Hermann Minkowski, qui considérait Einstein comme un dilettante lorsque celui-ci était son élève dix années auparavant à l'Institut de technologie de Zurich, fut le premier à se rendre compte que l'espace et le temps devaient être traités simultanément. Il reformula la relativité restreinte comme une théorie dans un espace à quatre dimensions, où le temps s'ajoutait comme quatrième dimension aux trois dimensions d'espace. « Désormais l'espace par lui-même et le temps par lui-même sont condamnés à disparaître dans les ténèbres, et seule la réunion des deux va conserver une réalité indépendante », déclara Minkowski en 1908. Des détails complémentaires sur l'espace-temps sont donnés dans *Plongée en eaux profondes : l'espace et le temps, un mariage parfait*.

Ceci était l'essence de la théorie d'Einstein de la relativité restreinte. Mais, alors qu'il rédigeait son article de revue de 1907, Einstein n'était pas satisfait. Sa théorie s'appliquait uniquement à des observateurs en mouvement à des vitesses uniformes les uns par rapport aux autres<sup>2</sup>. Un mouvement à vitesse uniforme implique non seulement que la valeur absolue de la vitesse, mesurée par exemple en mètres par seconde, ne varie pas, mais en plus que la direction de cette vitesse ne change pas. Que pouvait-on donc dire d'observateurs qui ralentissaient, accéléraient ou changeaient de direction ? Ralentir, accélérer ou changer de direction implique une accélération, et une accélération est la

---

<sup>2</sup> Il ne faut pas en conclure que la relativité restreinte ne s'applique pas à des observateurs accélérés ! Elle décrit parfaitement les accélérations dues aux forces électromagnétiques, par exemple dans les accélérateurs de particules. C'est spécifiquement la gravitation qui pose problème.

conséquence de l'application d'une force, par exemple la force de gravitation décrite par Isaac Newton. Mais les lois de la gravitation énoncées par Newton refusaient de se plier au nouveau schéma de l'espace-temps.

Les lois de Newton de la gravitation décrivent superbement le mouvement des planètes et les formes de leurs orbites autour du Soleil : des cercles étirés appelés ellipses. Elles décrivent même les perturbations apportées à une orbite par les autres planètes, et cela avait permis de prédire l'existence de la planète Neptune avant qu'elle ne soit vue dans les télescopes. Mais la théorie de Newton présentait un défaut dont Newton lui-même était conscient. La gravitation, dans sa théorie, était une force entre deux masses agissant de façon instantanée, quelle que fût la distance entre les deux masses. Bien que cela prenne huit minutes et vingt secondes à la lumière pour se propager du Soleil à la Terre, la théorie de Newton nous dit que déplacer le Soleil se répercuterait *instantanément* sur l'orbite de la Terre, en contradiction avec le principe cosmique selon lequel rien ne peut se propager plus vite que la lumière.

Mais, alors qu'il était sur le point de mettre un point final à son article, « la pensée la plus heureuse » vint à Einstein. Elle lui arriva alors qu'il était assis sur sa chaise au Bureau des brevets de Berne. Si un homme tombait d'un toit, comprit Einstein, il ne ressentirait pas son propre poids. *Il ne ressentirait pas la force de gravitation*. Cette pensée fut un éblouissement.

Aussi dur que fût l'atterrissage final sur le sol, pendant la durée de la chute libre l'homme ne ressentirait pas la gravitation. Et si, pendant sa chute, l'homme lâchait une balle ou ses clés sans leur donner de vitesse initiale, celles-ci l'accompagneraient dans sa chute en flottant auprès de lui<sup>3</sup>. Tout se passerait comme si ces objets étaient immobiles par rapport à lui.

Cette « expérience de pensée » d'Einstein lui fit comprendre autre chose. Un observateur peut remplacer l'accélération vers le bas due à la gravitation, au moins dans son voisinage immédiat, par une accélération constante vers le haut, c'est-à-dire une accélération qui augmente la vitesse avec un taux constant. Les deux situations sont équivalentes : « Il est impossible de détecter expérimentalement si un système de coordonnées est accéléré, ou si... les effets sont dus à un *champ de gravitation* », écrivit Einstein. Un champ de gravitation correspond à une région de l'espace où s'exercent des forces de gravitation. L'exemple le plus courant est le champ de gravitation terrestre, ou pesanteur : tout objet à la surface de la Terre est attiré vers son centre par la gravitation.

L'idée est si importante qu'il vaut la peine de la répéter d'une manière un peu différente. Imaginez que vous vous trouvez dans un ascenseur très loin dans

---

<sup>3</sup> Cette image est aujourd'hui familière : des objets flottent librement dans la cabine d'une station spatiale (ou à l'extérieur de celle-ci) autour d'un astronaute en chute libre sur la Terre.

l'espace intergalactique, à l'abri de toute force gravitationnelle. Un extraterrestre tire le haut de l'ascenseur de sorte qu'il accélère à un taux de  $9,8 \text{ m/s}^2$ , exactement l'accélération de la gravitation à la surface de la Terre, ou accélération de la pesanteur. Vos pieds se collent au plancher de l'ascenseur exactement comme si l'ascenseur était posé immobile sur la surface de la Terre. Si vous lâchez une balle, elle va tomber vers vos pieds exactement comme si l'ascenseur était posé sur la surface de la Terre. Sans regarder au dehors, il est impossible de savoir si vous êtes dans un ascenseur qui accélère vers le haut ou dans un ascenseur posé immobile sur la surface de la Terre. Il y a une certaine analogie avec l'exemple de Galilée où, sans regarder au dehors, vous ne pouvez pas détecter si le navire est amarré au quai ou en mouvement uniforme.

Au lieu de rester bloqué sur l'idée que gravitation et accélération sont équivalentes, Einstein a énoncé un postulat encore plus radical : toutes les lois de la Nature sont équivalentes, que vous soyez dans un champ de gravitation statique et uniforme, ou que vous soyez dans un référentiel comme un ascenseur qui accélère uniformément dans la direction opposée à celle du champ de gravitation. Les résultats de toute expérience menée dans un champ de gravitation uniforme ou dans un ascenseur accéléré sont identiques, que vous soyez en train de jongler, de sauter ou de vous verser un café. Cet énoncé est appelé le *principe d'équivalence*, et ses implications sont profondes et multiples pour la nature du temps, de l'espace et de l'Univers.

Mais pourquoi devrait-il en être ainsi ? Pour le comprendre, examinons les lois de Newton du mouvement et de la gravitation. Newton a énoncé que la force ( $F$ ) est égale à la masse ( $m$ ) multiplié par l'accélération ( $a$ ) :  $F = ma$ . Dans cette équation,  $m$  est la masse inertielle, la propriété qui décrit la résistance à une modification du mouvement. C'est la masse inertielle que vous devez combattre si vous voulez pousser une voiture immobile<sup>4</sup> ou l'arrêter lorsqu'elle roule.

Parallèlement, Newton postula la forme de la force gravitationnelle entre deux objets : selon Newton, celle-ci est proportionnelle au produit des masses des deux objets divisé par le carré de la distance  $r$  qui sépare les deux masses, supposées de très petite taille pour que cette distance soit bien définie :

$$F = -\frac{Gm_1m_2}{r^2}$$

Dans cette expression,  $m_1$  et  $m_2$  sont les masses gravitationnelles des deux objets, une mesure de la force d'attraction de ces masses par un champ de gravitation comme la pesanteur à la surface de la Terre,  $G$  est la *constante de gravitation*, qui

---

<sup>4</sup> Dans ce cas, il faut aussi vaincre les forces de frottement. Un meilleur exemple serait le fait de donner de l'élan à une patineuse sur la glace, cas où les forces de frottement sont faibles.

mécanique quantique 108-110, 112  
métrique de Friedmann-Lemaître 65  
métrique de Minkowski 25, 40  
métrique de Schwarzschild 78  
MIT (Massachusetts Institute  
of Technology) 149

## N

naine blanche 79, 88  
non-localité 104

## O

observateur 6-11, 14, 16-19  
onde électromagnétique 7, 134, 142  
onde gravitationnelle 116, 117, 122,  
129-132, 136  
ordinateur quantique 102-104

## P

paradoxe de Langevin 10  
paradoxe de l'information 99, 108, 109  
périhélie 26, 27, 37, 38, 63, 85  
polarisation 116, 123, 133  
pont d'Einstein-Rosen 101, 136  
postulat d'Euclide 30  
principe cosmologique 65  
principe d'équivalence 12-15, 20, 21,  
35, 37, 86-89, 91, 111  
principe de relativité 6, 7  
principe de superposition 87, 91  
principe holographique 97-99, 108  
pulsar 85, 88, 137, 138

## Q

quasar 83, 85, 120, 122, 149, 153  
qubit 102-105

## R

radian 122  
rayon de Schwarzschild 78, 81, 98,  
99, 122, 142  
rayonnement électromagnétique 117  
rayonnement de Hawking 109, 111,  
112  
relativité de Galilée 20  
relativité générale 1-4, 20, 25, 27, 32,  
38, 39  
relativité restreinte 10  
retard Shapiro 85

## S

Sagittarius A\* 4, 142, 145, 148  
seconde d'arc 27, 45, 55-57, 59, 82  
supernova 74, 124

## T

temps 1-5, 8-20, 23-27, 29, 34-42  
temps propre 10, 25, 136  
tenseur 34, 38, 39, 41, 42, 105,  
106  
tenseur énergie-impulsion 41  
tenseur de courbure 41  
tenseur de Riemann 34  
tenseur métrique 41  
théorème de Pythagore 9, 17, 30, 32,  
39, 40  
théorie des champs conforme 100  
théorie des cordes 105  
trou noir 1, 3, 25, 39, 59, 78, 80,  
81, 116  
trou de ver 100-102, 112  
trou noir stellaire 132  
trou noir supermassif 120, 132

## V

Virgo (détecteur interférométrique,  
Pise) 13, 19, 85, 121, 122, 131  
vitesse de la lumière 7-9, 15, 18, 25

vitesse uniforme 8, 10, 17, 18  
VLBI (interférométrie à très longue  
base) 144, 147  
VLT (Very Large Telescope, Chili) 124  
Voie lactée 66, 89, 96, 120, 128